

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

д.т.н.

Драгунов В.К.

2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертационную работу Карпова Павла Николаевича «Теплообмен при испарительном охлаждении поверхности многоструйным импульсным спреем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

1. Актуальность темы выполненной работы

Метод охлаждения теплонапряженных поверхностей с помощью газокапельного спрея является одним из наиболее эффективных. Он позволяет снимать значительные тепловые потоки при относительно малых расходах жидкой фазы. Так, например, отмечается, что охлаждение спреем обеспечивает те же значения теплоотдачи, что и при струйном, но при значительно меньших массовых расходах охладителя. Этим объясняется интерес исследователей к такому способу охлаждения и его внедрение в энергетику, машиностроение, металлургию, микроэлектронику, химическую и пищевую промышленности и т.д.

Работ по охлаждению в испарительном режиме, когда температура поверхности не достигает точки кипения, существенно меньше, хотя в практическом отношении такие исследования представляют несомненный

интерес для многих технологических процессов. Подобная ситуация имеет место прежде всего при двухфазном охлаждении электроники, где предельный уровень рабочих температур не может быть высоким, а также систем кондиционирования и охлаждения воздуха.

Одним из эффективных методов управления интенсивностью теплообмена является использование импульсной подачи охлаждающей жидкой фазы. За счет изменения частоты следования импульсов, а также их длительности можно реализовать большое число режимов, в том числе и наиболее эффективных, с точки зрения полноты использования энергии охлаждающей жидкости и минимизации ее расхода. Особенно остро эта проблема стоит для спрея в режимах испарительного охлаждения, а также при охлаждении поверхностей большой протяженности, когда необходимо использовать многосопловые системы с возможностью управления спреем как по времени, так и по поперечному сечению газочапельного потока.

2. Практическая значимость результатов работы

Результаты экспериментальных исследований в виде обобщающих зависимостей по локальной и средней теплоотдаче могут быть использованы при расчетах и проектировании систем испарительного охлаждения. Они могут составить основу для процесса оптимизации теплогидравлических характеристик новых схем охлаждения для широкого класса технологий, а также для верификаций теоретических моделей сложного тепломассопереноса.

Результаты исследований были использованы в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН при разработке системы охлаждения узлов высоковольтного питания спрей-охладителя для установки NICA г.Дубна, а также при разработке нового учебного курса «Механика» учебного направления НГУ «Мехатроника и робототехника», как практический материал, демонстрирующий механику турбулентного движения частиц жидкости капельного потока в неподвижной и движущейся спутной газовой среде.

3. Содержание выполненной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка литературы (129 наименований), двух приложений. Основной текст изложен на 132 страницах, содержит 58 иллюстраций и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель работы, поставлены основные задачи исследования. Сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, апробация результатов. Приведены положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор современного состояния вопроса в литературе. Показаны многочисленные области приложений спрей – потоков и возможные примеры интенсификации тепломассообменных процессов, даны сравнения с другими методами охлаждения. Анализируются особенности испарительных режимов охлаждения. Более детально рассмотрены импульсные спреи, их преимущества. Приведены сравнения с работами ведущих научных коллективов по данной тематике. Рассмотрены основные факторы, влияющие на формирование капельного потока: форма сопла, угол наклона, тип форсунки. Проанализировано взаимодействие потока капель с поверхностью. Сделан акцент на отсутствие достаточного количества работ по охлаждению поверхности импульсным газочапельным потоком.

Во второй главе представлено описание оригинальной экспериментальной установки, разработанной в Институте теплофизике СО РАН, методик измерения опытных данных и их обработки, а также проведен анализ неопределенностей измерений.

В третьей главе представлены опытные данные о величине коэффициента теплоотдачи полученного в случае одиночного по времени импульса распыляемой жидкости. На примере одиночного импульса представлены основные особенности импульсного охлаждения поверхности при значительном удалении источника до цели (в работе данное расстояние составляло 230 мм). При таком исполнении на поверхность первыми

долетают крупные капли - забирая большее количества тепла, затем на поверхности осаждаются мелкие капли. Далее в зависимости от расхода жидкости на поверхность отраженные от поверхности крупные капли возвращаются за счет воздействия на них спутного потока газа. Вторичные капли вносят дополнительный вклад в суммарный унос тепла от одного импульса. Представлены данные о распределении величины локального коэффициента теплоотдачи при кратковременной работе всех жидкостных форсунок для различных времен длительности импульсов.

В четвертой главе описываются основные характеристики потока формируемой газок капельной струи. Рассмотрено влияние параметров импульсного спрея на теплоотдачу. Одной из особенностей используемого метода является постоянный спутный поток газа. Как показано в работе, охлаждение поверхности только капельным потоком, или только газовой струей не настолько эффективно, как в случаи их совместного течения. По мнению автора, данный эффект связан, во-первых, со вторичными каплями, а во-вторых, с воздействием на пленку жидкости на поверхности. Спутный поток способствует более равномерному распределению осажденной пленки жидкости по всей поверхности. Кроме того, в окрестности стенки наблюдается повышенная турбулизация течения, что также способствует интенсификации пристенного теплопереноса. Показано влияние начальных параметров (удельного расхода и давления в системах подачи воды и воздуха.) на величину коэффициента теплоотдачи.

В пятой главе приведены данные о коэффициенте теплоотдачи при использовании водно-спиртового раствора в качестве охлаждающей жидкости. Анализ полученных данных показывает, что водные смеси этанола являются более эффективными жидкостями в тепловом отношении по сравнению со спреем из чистой воды. Показаны области интенсификации теплообмена в зависимости от соотношения концентраций компонентов водо – спиртовых смесей. Большое внимание уделено тепловой эффективности и вопросу утилизации жидкой фазы, расходуемой на охлаждение.

В целом текст диссертации написан добротнo, опечатки, пропуски слов, отсутствие ссылок на рисунки (рис.2.13 в частности) и неполное представление библиографических данных в списке литературы встречаются редко и не влияют на представленные результаты. Текст автореферата отражает содержание диссертационной работы.

4. Научная новизна результатов работы

Результаты экспериментального исследования получены в малоизученной области газокапельных потоков в режиме испарительного охлаждения с помощью многосоплового импульсного спрея. К главным научным результатам можно отнести:

1. Впервые получены опытные данные по нестационарному коэффициенту теплоотдачи в случае одиночного по времени импульса спрея различной продолжительности (2-50 мс). Установлено, что в зависимости от длительности импульса возможно существование режима теплообмена с одним максимумом (короткие импульсы 2- 10 мс) или с двумя по времени максимумами (импульсы > 10мс). Эти результаты являются основой для выбора оптимальных режимов охлаждения за счет подбора продолжительности импульса и их частоты повторений.
2. Показано, что основной вклад в интенсивность среднего по времени теплообмена вносит массовая скорость капельной фазы. Спутный поток воздуха интенсифицирует теплоотдачу в пределах 20%. Установлено, что тепловая эффективность спрея возрастает по мере сокращения времени импульса.
3. Для бинарных смесей жидкой фазы этанол-вода максимум теплоотдачи достигается при концентрациях этанола в диапазоне $K = 50-60\%$. При этом для чистой воды коэффициент теплоотдачи примерно в 1.5 раза ниже, чем для чистого этанола при используемой температуре стенки.

5. Достоверность полученных результатов

В диссертации подробно рассматривается большое число методов измерения аэрогидродинамических, тепло и - массообменных характеристик. Дается анализ источников погрешностей, расчет их величины и определение диапазона неопределенностей. Большое внимание в работе уделяется тестированию измерительных методик, включающих в себя как первичные сенсоры, так и средства автоматизации сбора данных и их компьютерной обработки. Достоверность полученных в работе данных подтверждается использованием тарированных средств измерений.

6. Полнота опубликованных результатов и апробации работы

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 научных работах, из них в рецензируемых журналах (перечень ВАК) – 2, а также работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 4. Основные результаты докладывались на ряде ведущих отечественных и зарубежных форумах по тепломассообмену и двухфазной гидродинамике.

7. Замечания по работе

При прочтении и обсуждении диссертации остается ряд вопросов:

1. В первой главе большое внимание уделяется обзору известных методов охлаждения поверхности. Для анализа и сравнения результатов исследований для используемой автором импульсной подачи охлаждающей жидкости отведено всего шесть страниц текста, что не достаточно для полного раскрытия ранее выполненных работ.
2. Во второй главе, при оценке неопределенностей ничего не сказано, как оценивались потери, связанные с уносом капель за время движения от источника до цели. Представлены данные о тарировках распределения жидкости по поверхности мишени, термостатированнии калориметра, но нет данных о тарировке датчика теплового потока.

3. Основной измеряемой величиной в исследованиях автора являлся коэффициент теплоотдачи (КТО). В диссертации нет описания процедуры определения температуры стенки. Как измерялась средняя и локальная температура стенки при определении соответствующих КТО?
4. В Главе 5 нет информации об условиях эксперимента: температура окружающей среды, влажность, условиях подготовки растворов. При работе с растворами необходимо учитывать данные параметры.
5. В экспериментах использовано единственное значение температуры стенки. Результаты и выводы, полученные на чистых жидкостях, и особенно смеси вода-спирт соответствуют только данной температуре. Почему не выполнены исследования при других значениях температуры?

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Решена сложная техническая задача формирования управляемых импульсных потоков капель жидкости на относительно большую поверхность, в условиях в том числе и спутного потока воздуха. Получены представительные данные о теплообмене в зависимости от параметров импульса, расходов жидкой и газообразной фаз. Решена задача реализации высокоэффективного теплообмена с наиболее полным использованием энергии капель и соответствующей минимизацией расхода жидкости.

8. Заключение

Диссертационная работа Карпова П.Н. на тему «Теплообмен при испарительном охлаждении поверхности многоструйным импульсным спреем» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему.

Диссертационная работа Карпова Павла Николаевича «Теплообмен при испарительном охлаждении поверхности многоструйным импульсным спреем», представленная на соискание ученой степени кандидата

технических наук, полностью удовлетворяет критериям п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённом Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, **Карпов Павел Николаевич** заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14— «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа доложена и обсуждена на расширенном заседании НТС кафедры ОФиЯС НИУ «МЭИ» «18» ноября 2021 г. (протокол №3/21). Работа получила положительную оценку, рекомендована к защите, по результатам обсуждения на НТС составлен настоящий отзыв.

Зав. каф. ОФиЯС,
Д.т.н., член-корр. РАН

Дедов Алексей Викторович

Профессор кафедры ИТФ
Д.т.н., профессор

Кузма-Кичта Юрий Альфредович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Телефон: +7 495 362-75-60

Веб-сайт: <https://www.mpei.ru/>

Email: universe@mpei.ac.ru

Доинициал в совет 06.12.2021

Уч. секретарь ДС Оу / Воронин О.В.

С отзывом ознакомлен 04.12.2021

Карпов П.Н.